

УДК 331.101.1

О.М.ДІДЕНКО, Я.О.СЕРІКОВ, канд. техн. наук

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова***ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ  
В СИСТЕМІ «ПРАЦІВНИК – ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА  
УСТАНОВКА – СЕРЕДОВИЩЕ»**

Описано характеристики й фізичні явища, що необхідні при математичному моделюванні процесу поширення звукової хвилі в системі «працівник – вітроенергетична установка – середовище».

Описаны характеристики и физические явления, которые необходимы при математическом моделировании процесса распространения звуковой волны в системе «работник – ветроэнергетическая установка – среда».

Characteristics and the physical phenomena which are necessary at mathematical modelling process distribution of a sound wave to system «working – wind power installation – environment» are described.

*Ключові слова:* звукова хвиля, хвильове рівняння, інтерференція, відбиття, дифракція, заломлення.

Важливим завданням, вирішення якого необхідне для подальшого розвитку економіки України, є модернізація енергетичної галузі, що є однією з пріоритетних для України. При цьому, одним із сучасних напрямків, що реалізуються в розвинутих країнах, є використання нетрадиційних відновлювальних джерел енергії, серед яких на сьогодні активно використовується вітроенергетика.

Аналіз літературних даних показує, що поряд зі значними перевагами вітроенергетики, функціонування вітроелектричних станцій (ВЕС) характеризується і негативними антропогенними факторами. Так ВЕС є одним із джерел шумового забруднення в системах «Працівник – вітроенергетична установка (ВЕУ) – територія ВЕС» і «Людина – ВЕУ – середовище». На сьогодні відсутнє розв'язання завдань із забезпечення ергономічної безпеки за фактором шуму в указаних системах. Це призводить до значних збитків, що виражаються у зростанні рівня професійних захворювань, зниженні продуктивності, безпеки праці, акустичного дискомфорту в прилягаючій до ВЕС сельбищній зоні.

В зв'язку з цим є актуальним проведення досліджень системи П – ВЕУ – С для підвищення ефективності трудової діяльності, зі збереженням здоров'я працівників ВЕС.

Дослідження залежності шумового забруднення в системі П – ВЕУ – С від умов розташування вітроенергетичних установок на ВЕС,

ставить за мету розробку методики ергономічного забезпечення за рахунок зниження рівнів шуму на робочих місцях.

Для досягнення вказаної мети необхідно застосувати моделювання процесу поширення звукової хвилі в повітрі з урахуванням характеристик та фізичних явищ, що спостерігаються при її розповсюдженні.

Модель, в широкому значенні, – це образ якого-небудь об'єкту, що є оригіналом, або системи об'єктів. Існують наступні типи моделювання [2]:

- а) фізичне;
- б) математичне;
- в) імітаційне.

Математичне моделювання полягає в розробці сукупності математичних співвідношень, що описують з тим або іншим ступенем точності процес функціонування системи. Математична модель (ММ), як правило, містить опис множини можливих станів системи, опис закону, відповідно до якого система переходить з одного стану в інший, і задає макрофункцію системи – залежність вихідного сигналу (відгуку системи) від стану системи і вихідних впливів.

Математика, як метод пізнання навколишнього світу, не завжди може дати повний (ідеальний) опис реальних явищ, процесів і об'єктів [1-3]. Методом ідеалізації реальних процесів є математичне моделювання. Кінцевим етапом математичного моделювання є створення математичної моделі – математичного описання явища, процесу з визначеним ступенем достовірності. Виходячи з цього слідуює, що чим вищі вимоги до точності, адекватності результату моделювання, тим більшу кількість чинників необхідно враховувати при побудові моделі.

Вимога забезпечення необхідного ступеня адекватності модельованого процесу є однією з найважливіших при побудові моделі. Таким чином, адекватність означає правильність якісного опису об'єкта за вибраними характеристиками [1, 3].

Для побудови математичної моделі розповсюдження звукової хвилі від ВЕУ застосуємо відомий підхід до опису складних систем математичного моделювання «блочно-ієрархічний підхід».

Створення математичної моделі розповсюдження звукової хвилі в системі П-ВЕУ-С передбачає вивчення і врахування фізичних явищ та характеристик цієї хвилі.

1. Характеристики звукової хвилі, що поширюється в системі «Працівник – Вітроенергетична установка – Середовище».

*Характеристики звуку.*

При роботі ВЕУ генеруються і розповсюджуються поперечні сферичні хвилі. Хвильове рівняння має вигляд [4]:

$$u = u(r, t). \quad (1)$$

Уявімо довільну точку D, яка рівномірно обертається по колу з радіусом A проти часової стрілки, з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  (рад/с) (рис. 1) [5]. Рівняння руху точки D, буде мати вигляд:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут повороту рухомого радіусу OD відносно нерухомого ОК;  
 $\varphi_0$  – початкове значення кута  $\varphi$  в момент часу  $t = 0$ .

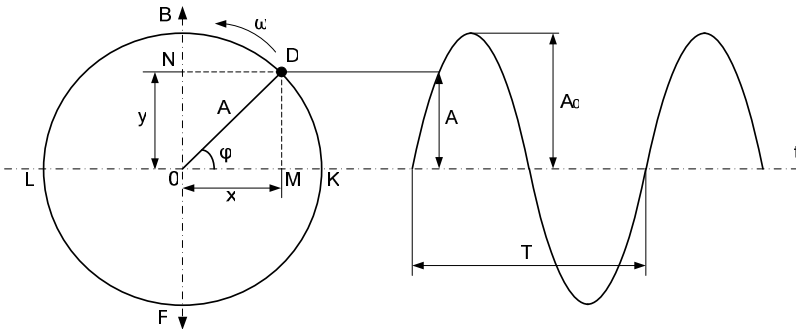


Рис. 1 – Графічне зображення визначення характеристик елементів гармонічного коливального процесу

По мірі руху точки D, як джерела коливального процесу, її проекція – точка N на відрізок BF, буде змінювати своє положення. Таким чином вона буде здійснювати коливальний рух. Тоді рівняння руху поперечної хвилі (рис. 2) буде мати вигляд [4]:

$$y = A \sin 2\pi f t = A \sin 2\omega t. \quad (3)$$

Таке коливання джерела (точки D) викличе гармонічний коливальний рух пружно пов'язаних з ним сусідніх точок з тією ж самою амплітудою A і кутовою частотою  $\omega$ . Однак, наступні точки почнуть коливатися з деяким запізненням, тим більшим, чим більша відстань між точкою та джерелом. Так, наприклад, для точки N, яка знаходиться на відстані r від джерела, початок коливань буде відставати від початку коливань на відрізок часу  $\tau = r/c$ , де c – швидкість розповсюдження хвилі у середовищі [4].

Швидкість звуку в газах залежить від його щільності, статичного тиску, температури. Швидкість звуку в повітрі при температурі  $t = 20^\circ\text{C}$  дорівнює приблизно 340 м/с.

В газоподібному середовищі розповсюджуються хвилі стискання (повздовжні хвилі). У таких хвилях напрямок коливань часточок співпадає з напрямком розповсюдження коливань. Коливальний процес в повітрі (газоподібному середовищі) характеризується однією пружною сталою – коефіцієнтом стисливості (чи зворотною величиною – модулем пружності).

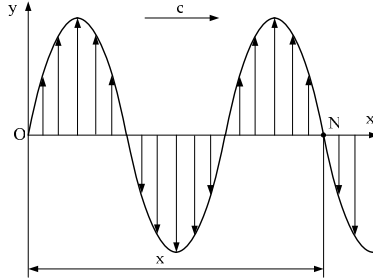


Рис. 2 – Графічне зображення процесу розповсюдження поперечної хвилі

Позначимо точку  $N$  як  $y_M$  (рис. 2). Зміщення точки  $N$  ( $y_M$ ) в момент часу  $t$  буде дорівнювати зміщенню  $y_0$  точка  $O$  в момент часу  $t'$  і може бути визначене за формулою:

$$t' = t - \tau = t - \frac{r}{c}. \quad (4)$$

У разі відсутності затухання, за амплітудою це зміщення буде дорівнювати вихідному. Відповідно:

$$y_M(t) = y_0(t') = A \sin \omega t'. \quad (5)$$

Підставивши значення  $t'$  знаходимо, що відхилення від положення рівноваги точки, що знаходиться на відстані  $r$  від джерела хвилі, в момент часу  $t$  дорівнює:

$$y_M(t) = A \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right) = A \sin 2\pi f \left( t - \frac{r}{c} \right). \quad (6)$$

При русі хвилі справа наліво знак її швидкості розповсюдження змінюється:

$$y_M(t) = A \sin 2\pi f \left( t + \frac{r}{c} \right). \quad (6a)$$

З рівняння (6) витікає, що зміщення ( $y$ ) довільної точки  $N$  залежить від двох змінних: часу коливання  $t$  і відстані до джерела  $r$ . Якщо виконати заміну в виразі (6) кутової частоти  $\omega$  на період коливань  $T = 2\pi / \omega = 1 / f$ , то отримаємо:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\omega} \left( t - \frac{r}{c} \right) = A \sin \left( \frac{2\pi}{T} - \frac{2\pi r}{cT} \right). \quad (7)$$

З виразів (6) і (7) виходить, що всі точки хвилі коливаються з однаковими амплітудою  $A$  і періодом  $T$ , але з різними початковими фазами. Фаза точки  $N$  відрізняється від фази точки, що знаходиться на початку системи координат, на  $2\pi r/cT$ .

2. Фізичні явища, параметри й залежності, що спостерігаються при розповсюдженні звукової хвилі в повітряному середовищі.

В однорідному середовищі звукова хвиля розповсюджується з постійною швидкістю. Але реальне середовище, в якому розповсюджується хвиля, є неоднорідним. Тому при моделюванні процесу її розповсюдження необхідно враховувати такі явища, як інтерференція, відбиття, дифракція, заломлення, поглинання, розсіювання [4,6,7].

#### *Інтерференція звукових хвиль.*

Якщо через визначену область простору поширюється одночасно декілька хвиль, то коливання будь-якої точки середовища, що викликається кожною хвилею окремо, будуть складатися один з одним за правилами складання коливань [4]. Таким чином, коливання кожної точки середовища є сумою незалежних коливань, викликаних кожною із одночасно діючих на точку хвиль окремо.

Якщо частота коливань двох хвиль однакова і різниця фаз змінюється з часом, такі хвилі називають когерентними. В результаті накладання когерентних хвиль спостерігається явище – інтерференція. Необхідність враховування явища інтерференції хвиль полягає в тому що, якщо фази коливань двох чи більше хвиль однакові, то це призводить до підвищення сумарної амплітуди хвилі (в розглядуваному випадку – звукової) за рахунок додавання їх амплітуд. Як результат – формується значне збільшення рівня звукового тиску, який є негативним фактором системи «Працівник – Віброенергетична установка – Середовище».

Розглянемо ефект інтерференції як результат спільної дії коливання двох плоских хвиль у фіксованій точці  $M$ .

Приймаємо, що кожна з хвиль поширюється від окремої ВЕУ, що розташовані в точках  $(O_1)$ ,  $(O_2)$ , (рис. 3). Відстань  $O_1M$  позначимо  $r_1$ , а  $O_2M$  –  $r_2$ . Прийmemo, що початкові фази хвиль дорівнюють 0.

Рівняння для першої хвилі:

$$y_1 = A_1 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right). \quad (8)$$

Рівняння другої хвилі:

$$y_2 = A_2 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right). \quad (9)$$

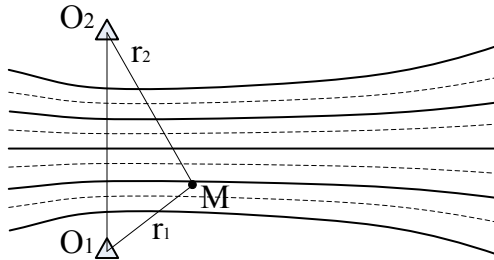


Рис. 3 – Графік результуючих коливань від двох плоских хвиль

Приймаємо також, що ВЕУ мають однакову потужність і тому амплітуда обох хвиль буде практично однаковою, при умові що  $r_1$  і  $r_2$  за величиною відрізняються не значно:

$$A_1 = A_2 = A. \quad (10)$$

Результуюча амплітуда звукової хвилі в точці М буде дорівнювати сумі двох коливань, що приходять в точку М, які будуть відрізнятися лише фазами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , оскільки ці фази залежать від відстаней  $r_1$  і  $r_2$ .

$$\varphi_1 = -2\pi \frac{r_1}{\lambda}, \quad \varphi_2 = -2\pi \frac{r_2}{\lambda}.$$

Відповідно, що зміщення точки коливального процесу в точці М буде дорівнювати:

$$y = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) + A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right);$$

$$y = 2A \cos \left( 2\pi \frac{r_1 - r_2}{\lambda} \right) \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1 - r_2}{\lambda} \right) = B \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1 - r_2}{\lambda} \right).$$

При цьому амплітуда резонансного коливання (В), яке буде існувати в результаті явища інтерференції, може обрахована за такою формулою:

$$B = 2A \cos \left( 2\pi \frac{r_1 - r_2}{\lambda} \right). \quad (11)$$

Суттєво, що амплітуда В сумарного коливання (у) залежить від різниці відстаней точки М від джерел шуму.

Розглянемо два випадки:

1. Різниця відстаней  $r_1$  і  $r_2$  від джерел шуму до точки М дорівнює цілому числу довжин хвиль:

$$r_1 - r_2 = n\lambda, \quad (12)$$

де  $n$  – будь-яке ціле (позитивне або від'ємне) число  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ .

У всіх точках, в яких має місце співвідношення (12), для В отримаємо:

$$B = 2A \cos n\pi = \pm 2A. \quad (13)$$

2. Різниця відстаней  $r_1$  і  $r_2$  від джерел шуму до точки М рівна числу  $(n + \frac{1}{2})$  довжин хвиль або непарному числу довжин хвиль:

$$r_1 - r_2 = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (14)$$

В цьому випадку амплітуда сумарних коливань (В) буде дорівнювати

$$B = 2A \cos\left(n\pi + \frac{\pi}{2}\right) = 0. \quad (15)$$

Таким чином, в результаті явища інтерференції в цьому разі амплітуда сумарної хвилі дорівнює нулю.

В разі, коли амплітуди хвиль  $A_1$  і  $A_2$  різні, то в точці М, відповідно до умови (11), результуюча амплітуда буде дорівнювати:

$$B = A_1 + A_2. \quad (16)$$

Практично в точці М, відповідно до умови (15), повного загасання амплітуди не відбудеться, але вона досягне найменш можливого значення, рівного модулю різниці амплітуд  $|A_1 - A_2|$ .

$$|A_1 - A_2| \leq B \leq A_1 + A_2. \quad (17)$$

Відомо, що енергія коливань  $E$  пропорційна квадрату амплітуди. Це справедливо для будь-якої точки хвильового поля. В найпростішому випадку, при однакових амплітудах інтерферованих хвиль, визначаємо, що енергія коливання в даній точці хвильового поля пропорційна  $B^2$  і відповідно:

$$E \propto B^2 = 4A^2 \cos^2\left(2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda}\right). \quad (18)$$

Таким чином, при інтерференції хвиль, в області максимуму значення енергії коливань  $E$  підвищується в 4 рази (за порівнянням з енергією коливань, що збуджується одним джерелом) (випадок 1), а в області мінімуму – дорівнює нулю (випадок 2).

*Явище відбиття хвилі.*

Хвиля, яка падає на границю розподілу двох середовищ, що відрізняються акустичним опором (наприклад, повітря – ґрунт), буде проходити крізь неї, частково відбиваючись. Залежно від співвідношення акустичних опорів, щільності цих середовищ це явище буде відбуватися по-різному [4]. Хвиля, яка відбилася, при цьому змінює фазу коливань. Амплітуда відбитої хвилі буде менше, тому що частина енергії падаючої хвилі буде витрачатися на збудження хвиль в другому середовищі. Слід відмітити, що швидкість розповсюдження хвилі  $c_{11}$  в другому середовищі (більш щільному) буде відрізнятися від швидкості розповсюдження хвилі  $c_1$  в першому середовищі. А оскільки частота хвилі зберігається – вона дорівнює частоті коливань хвиль  $f$ , то змінюється довжина хвилі  $\lambda_{11} = c_{11} / f \neq \lambda_1 = c_1 / f$ .

Виходячи з викладеного вище, відносно вітроенергетичних установок, слід вказати наступне. ВЕУ постійно випромінює хвилі. При цьому хвилі, що випромінюються ВЕУ, при розповсюдженні можуть відбиватися від границі різних середовищ. В цьому разі хвиля, яка поширюється від ВЕУ, як джерела, буде складатися з хвилею, що відбилася. Хвиля, що поширюється в напрямку границі двох середовищ – «пряма», а відбита на цій границі – «зворотна». Якщо фази «прямої» і «зворотної» хвиль будуть однакові, то результуюче коливання довільної точки середовища буде складатися з двох когерентних хвиль, що поширюються в протилежних напрямках.

Зміщення, яке викликане «прямою» та «зворотною» хвилями, задамо, відповідно до (6), такими формулами:

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{прям}}(t) &= A \sin 2\pi f \left( t - \frac{r}{c} \right), \\ y_{\text{звор}}(t) &= A \sin 2\pi f \left( t + \frac{r}{c} \right). \end{aligned} \right\} . \quad (19)$$

В результаті інтерференції прямої та зворотної хвилі коливання в точці  $x$  буде підкорятися закону

$$\begin{aligned} y &= y_{\text{прям}} + y_{\text{звор}} = A \left[ \sin 2\pi f \left( t - \frac{r}{c} \right) + \sin 2\pi f \left( t + \frac{r}{c} \right) \right] = \\ &= 2A \cos \left( 2\pi f \frac{r}{c} \right) \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad , \quad (20)$$

або, так як  $\lambda = cT$  :



$$y(r, t) = 2A \cos\left(2\pi \frac{r}{\lambda}\right) \sin(2\pi f t) = B(r) \sin(2\pi f t). \quad (21)$$

Хвилю, яка сформувалася в результаті описаних явищ, називають «стояча хвиля».

#### *Дифракція хвиль.*

Пружні коливання поширюються на великі відстані від їх джерела не миттєво, а поступово, від однієї точки середовища до сусідньої [4].

Згідно з принципом Гюйгенса, кожна точка хвильового поля, що ввійшла в коливальний процес, стає сама джерелом вторинних хвиль. Результуюча хвиля, що поширюється далі, виникає як наслідок накладання та інтерференції всіх хвиль від вторинних елементарних джерел.

Принцип Гюйгенса дає змогу пояснити явище дифракції – здатність хвилі при падінні на перешкоду (залежно від співвідношення довжини хвилі ( $\lambda$ ) і розміру перешкоди ( $l_T$ ) огинати її [6]. Якщо  $\lambda > l_T$ , то за перешкодою утворюється акустична тінь. Розміри тіні залежать від співвідношення довжини хвилі  $\lambda$  і розмірів перешкоди  $l_T$ . Якщо дифракція відбувається в паралельних променях, то протяжність тіні ( $l_T$ ) можна визначити за формулою:

$$l_T = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4c}, \quad (22)$$

де  $D$  – поперечний розмір перешкоди.

Залежно від співвідношення довжини хвилі, розмірів перешкоди ( $h$ ), її відстані від джерела ( $r$ ) і до РТ ( $R$ ), величина ослаблення звуку за перешкодою буде становити від 1 до 20 дБ.

#### *Заломлення хвилі.*

При непостійній швидкості поширення звукових коливань від ДШ виникає заломлення, причиною якого може бути коливання температури та зміна вітру [6, 7]. Якщо тип середовища є постійним, то і зміни швидкості звуку, які спостерігаються при цьому є незначними. Заломлення хвилі приймає суттєві значення в тому разі, коли відстань між джерелом і приймачем звуку (шуму) є значною.

Процес розповсюдження звукових хвиль в неоднорідному середовищі є достатньо складним, тому в більшості випадків задовольняються розрахунком «звукових променів», тобто припускають, що на певній відстані і при певній довжині хвилі, швидкість звуку змінюється незначно. З урахуванням цього можна застосувати принцип Ферма про найменший час пробігу хвилі або закон заломлення Снеліуса, який свідчить про те, що так звана довжина сліду хвилі ( $\lambda/\sin \theta$ ) не залежить

від середовища, а залежить від співвідношення зміни швидкості поширення хвилі:

$$\sin \Theta_2 = \frac{c_2}{c_1} \sin \Theta . \quad (23)$$

Звукова хвиля, падаючи із одного середовища зі швидкістю звуку  $c_1$  під кутом  $\Theta$ , потрапляючи через плоску граничну поверхню в інше середовище, рухається уже під кутом  $\Theta_2$  і поширюється в ньому зі швидкістю звуку  $c_2$ .

Таким чином для підвищення ефективності трудової діяльності працівників в системі «Працівник – Вітроенергетична установка – Середовище» та збереженням здоров'я працівників ВЕС, необхідно знизити негативний вплив шуму, що генерується ВЕУ.

Для вирішення поставленого завдання було вивчено властивості та характеристики звукової хвилі, ефекти звукової хвилі при поширенні в повітрі (інтерференція, відбиття, дифракція, заломлення.). При подальшому моделюванні це дасть змогу створити математичну модель з необхідною адекватністю для визначення рівней звукового тиску як на території, так і в навколишньому середовищі. Модель необхідна при проектуванні ВЕС або реконструкції існуючої.

1. Завадский В.Ю. Моделирование волновых процессов / В.Ю. Завадский. – М.: Наука, 1991. – 248 с.

2. Карась В.І. Математичне моделювання у світлотехніці: навч. посібник. / В.І. Карась, Л.А. Назаренко, І.В. Карась; Харк. нац. акад. міськ. гос-ва. – Х.: ХНАМГ, 2008. – 227 с.

3. Любарский Г.Я. Математическое моделирование и эксперимент / Г.Я. Любарский, Р.П. Слабоспицкий, М.А. Хажмурова, Р.И. Адушкина. – К.: Наукова думка, 1987. – 160 с.

4. Зиман Г.А. Курс общей физики: в 2 т. Т.1 «Механика, молекулярная физика, колебания и волны» / Г.А. Зиман, О.М. Тодес. – М.: Наука, 1974. – С. 258-327.

5. Осипов Г.Л. Защита зданий от шума / Георгий Львович Осипов. – М.: Стройиздат, 1973. – 216 с.

6. Аксенова О.Т. Учебно-методический комплекс по дисциплине «Основы акустики» для студентов очной и заочной сокращенной форм обучения специальности 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» / О.Т. Аксенова, Амурский гос. ун-т. – Благовещенск, 2008. – 46 с.

7. Справочник по технической акустике / под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера; пер. с нем. – Л.: Судостроение, 1980. – 440 с.

*Отримано 28.10.2013*